



TITLE:

# Study on Novel Rectifiers for Microwave Wireless Power Transfer System( Abstract\_要旨 )

AUTHOR(S):

Wang, Ce

---

CITATION:

Wang, Ce. Study on Novel Rectifiers for Microwave Wireless Power Transfer System. 京都大学, 2020, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2020-05-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k22658>

RIGHT:

許諾条件により本文は2020-06-01に公開

京都大学	博士（工学）	氏名	王 策
論文題目	Study on Novel Rectifiers for Microwave Wireless Power Transfer System (マイクロ波無線電力伝送システム用整流回路に関する研究)		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文では、様々な応用が考えられるマイクロ波無線電力伝送システムのうち、特にマイクロ波を整流し電力に変換する整流回路に注目し、マイクロ波電力レベルに応じた整流回路の高効率化について研究を行ったものである。本論文では、(1)弱電力応用のための F 級負荷 Charge Pump 整流回路とそのレクテナアレー化の研究、(2)中電力応用のための多段 Dickson F 級負荷 Charge Pump 整流回路の開発、(3)大電力応用のための GaAs ショットキーダイオードを用いた高変換効率整流回路の開発、(4)最適負荷抵抗が調整可能な整流回路設計手法の研究、という 4 つの課題に取り組んだ成果についてまとめており、全 7 章から構成される。</p> <p>第 1 章は序論であり、本論文の研究背景として、マイクロ波無線電力伝送の歴史や様々な応用例がまとめられ、マイクロ波無線電力伝送の有用性が述べられている。さらに本研究の核となるマイクロ波整流回路の基本動作原理について述べられており、本研究が解決する整流回路の課題と本論文の着眼点を明確にしている。</p> <p>第 2 章では弱電力応用のための F 級負荷 Charge Pump 整流回路の研究についてまとめている。弱電力のマイクロ波無線電力伝送では、Charge Pump 整流回路が一般的に用いられる。しかし従来の Charge Pump 整流回路は B 級整流を用いるため、最大整流効率は理論的にも 70% であり、実際は 40% から 60% であった。本研究では、さらなる高効率化を図るため、Charge Pump 整流回路に、中・大電力のマイクロ波無線電力伝送で用いられるシングルシャント型整流回路の重要構成要素であり、高調波処理回路である F 級負荷を導入した。F 級負荷を世界で初めて Charge Pump 整流回路に導入することで、市販ショットキーバリアダイオードを用いて、シングルシャント型整流回路と同程度となる整流効率約 72% を実現することができた。理論的な比較検討も行い、主にダイオード損失等を中心に損失を比較した結果、F 級負荷 Charge Pump 整流回路とシングルシャント型整流回路は同程度の変換効率になることを導き、理論解析と実測結果は一致することも確認した。</p> <p>第 3 章では Charge Pump 整流回路のアレー化に関する研究成果についてまとめている。整流回路は電力向上のために複数をアレー化して用いることが多い。先行研究により、シングルシャント型整流回路をレクテナアレーとして使用するとき、整流回路を N 個並列接続する場合は最適負荷抵抗が 1/N になり、N 個直列接続する場合は N 倍になることが知られていたが Charge Pump 整流回路での検討がなされた例はなかった。検討の結果、本研究で提案する F 級負荷 Charge Pump 整流回路でも同様の関係になることを確認した。つまり F 級負荷 Charge Pump 整流回路のトポロジーはシングルシャント型整流回路と異なるが、ダイオードと負荷抵抗は同様に線形関係であることを本研究で初めて示し、F 級負荷 Charge Pump 整流回路アレー化した場合における負荷抵抗変化を明らかにすることができた。</p> <p>第 4 章では中電力応用のための多段 Dickson F 級負荷 Charge Pump 整流回路の研究開発についてまとめている。課題(1)では単段の F 級負荷 Charge Pump 整流回路に関し研究開発を行ったが、Charge Pump 整流回路は多段化して出力電圧を高めることが一般的である。Charge Pump 整流回路を多段化する手法は複数あるが、本研究では</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	王 策
<p>多段 Dickson 整流回路のトポロジーを用いた多段 Dickson F 級負荷 Charge Pump 整流回路の開発を行った。本回路は入力電力を各段 F 級負荷 Charge Pump 整流回路に等分し、各段 F 級負荷 Charge Pump 整流回路の直列接続によって出力電圧を昇圧する回路である。多段 Dickson 整流回路は電力分配線路と F 級負荷 Charge Pump 整流回路の二つ部分で構成される。各段整流回路の相互影響を抑えるため、Wilkinson 分配線路を使用している。2 段及び 4 段 Wilkinson 分配線路を開発したのち、2 段及び 4 段 Dickson F 級負荷 Charge Pump 整流回路を開発した。開発した 2 段、4 段の各 Dickson F 級負荷 Charge Pump 整流回路において、整流効率及び出力電圧はそれぞれ約 70%、9V 以上、および約 60%、15V 以上となり、情報処理ユニット等のデジタル回路等を駆動することも可能となった。</p> <p>第 5 章では大電力応用のための新型 GaAs ショットキーダイオードを用いた高変換効率整流回路の開発についてまとめている。本章ではさらなる整流効率の向上のため、シングルシャント型整流回路を採用している。まず高効率を実現するために、SPICE パラメータの存在しない新型 GaAs ショットキーバリアダイオードのパラメータ推定から行った。次に測定結果をもとにモデリングした高周波ダイオードパラメータを用いて、整流回路の設計開発を行った。その結果、2.45GHz 帯では世界最高効率となる 91%の整流効率(@5W マイクロ波入力)を達成した。さらに今回測定した新型 GaAs ショットキーバリアダイオードの SPICE パラメータをもとに、変換効率への影響について検討し、より高効率の整流回路を実現するために必要なダイオードへの要求事項を示した。</p> <p>第 6 章では最適負荷抵抗が調整可能な整流回路設計手法についてまとめている。マイクロ波無線電力伝送システムの受信側におけるレクテナ変換効率は負荷抵抗に強く依存することが知られている。実際応用する時、負荷抵抗とレクテナ設計最適負荷抵抗とが不整合となる場合は多々あり、これによって、整流効率の低下が考えられる。また、一般的に入力電力と最適負荷抵抗は互いに依存する。本課題では、整流回路上のダイオードとグラウンド点間の線路長を利用し、ダイオードの特性インピーダンスを調整することにより、同じ入力電力において、負荷抵抗を調整する整流回路の設計手法を新しく提案した。F 級負荷 Charge Pump 整流回路とシングルシャント型整流回路において、ダイオードと負荷抵抗は線形関係であるため、負荷抵抗調整する設計法は適用できる。また、多段 Dickson F 級負荷 Charge Pump 整流回路にも適用可能であると考えられる。負荷抵抗調整設計手法の検証実測結果において、シングルシャント型整流回路は整流回路上のダイオードとグラウンド点間の線路長を変化させることにより、整流効率を維持したまま最適負荷を 300Ω から 500Ω に変化させることに成功した。F 級負荷 Charge Pump 整流回路の場合は最適負荷を 1000Ω から 1100Ω まで変化させ、多段 Dickson F 級負荷 Charge Pump 整流回路は負荷抵抗を 1000Ω から 1900Ω までに変化させることにも成功した。実測結果から、3 種類の整流回路とも提案する負荷抵抗調整設計手法が適用可能であることを証明した。</p> <p>第 7 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約されている。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文では、様々な応用が考えられるマイクロ波無線電力伝送システムの構成要素で、特にマイクロ波を整流し電力に変換する整流回路に注目し、マイクロ波電力レベルに応じた整流回路の高効率化について研究成果をまとめたものである。本論文の主な成果は以下のとおりである。

- (1) 弱電力マイクロ波入力において整流効率の高効率化を図るため、**Charge Pump** 整流回路に高調波処理回路である **F 級負荷**を世界で初めて導入した。**F 級負荷**は、中・大電力のマイクロ波無線電力伝送応用でよく用いられるシングルシャント型整流回路の重要構成要素である。本論文では市販ショットキーバリアダイオードを用いて、シングルシャント型整流回路と同程度となる整流効率約 **72%**を実現することができた。
- (2) 中電力マイクロ波無線電力伝送応用のために、多段 **Dickson** 整流回路のトポロジーを用いた多段 **Dickson F 級負荷 Charge Pump** 整流回路の開発を行い、2 段、4 段の各 **Dickson F 級負荷 Charge Pump** 整流回路において、整流効率及び出力電圧はそれぞれ約 **70%**、**9V** 以上、および約 **60%**、**15V** 以上となり、情報処理ユニット等のデジタル回路等を駆動することも可能となった。
- (3) 大電力応用のための新型 **GaAs** ショットキーダイオードを用いた高変換効率整流回路を開発し、**2.45GHz** 帯では世界最高効率となる **91%**の整流効率(@**5W** マイクロ波入力)を達成した。本研究の課程で得た新型 **GaAs** ショットキーバリアダイオードの **SPICE** パラメータをもとに、変換効率への影響について検討し、より高効率の整流回路を実現するために必要なダイオードへの要求事項を示した。
- (4) 整流回路上のダイオードとグラウンド点間の線路長を利用し、ダイオードの特性インピーダンスを調整する手法を考案し、入力電力レベルに応じて、最適負荷を調整する整流回路の設計手法を示した。実測結果において、シングルシャント型整流回路、**Charge Pump** 整流回路と多段 **Charge Pump** 整流回路にも適用できることを示した。

以上を要するに、本論文は、様々な電力レベルのマイクロ波無線電力伝送システムを想定し、様々な形式の整流回路の検討を行い、過去に実現されたことのない **F 級負荷 Charge Pump** 整流回路の開発や、世界最高の整流効率をもつシングルシャント型整流回路の開発の成果についてまとめたものである。本研究は新しい整流回路の研究開発を通じ、マイクロ波無線電力伝送システムの社会実装性向上の見通しを与えており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。令和 2 年 4 月 16 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。